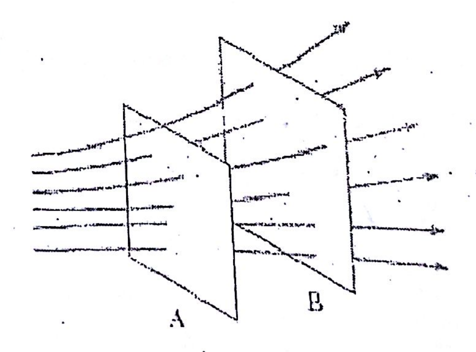
23.6. خطوط الحقل الكهربائي

كنا قد عرّفنا الحقل الكهربائي رياضياتياً من خلال العلاقة (23.7). أما الآن فسنقوم بتقديم أسلوب تمثيل الحقل الكهربائي صورياً من خلال الرسم. إن إحدى الطرق الملائمة لتصوير نماذج محاكية للحقل الكهربائي هي القيام برسم خطوط منحنية، في محيط الشحنة-المصدرة أو التوزع الشحني-المصدر، بحيث تكون هذه الخطوط في كل نقطة منها موازية لمتجهة الحقل الكهربائي. إن هذه الخطوط المنحنية، التي أدخلها لأول مرة فارادي لكي يصور الحقل الكهربائي في منطقة تأثير الشحنة، تدعى بخطوط الحقل الكهربائي. تتعلق خطوط الحقل الكهربائي بالحقل الكهربائي في منطقة الفراغ بالخواص التالية:

- عند كل نقطة من نقاط هذا الخط، تكون متجهة الحقل الكهربائي E مماسية لخط الحقل الكهربائي. ويمتلك كل الخط جهة يُشار إليها بسهم؛ يكون مسايراً لاتجاهات الحقل الكهربائي.
- يكون عدد الخطوط بوحدة المساحة (كثافة الخطوط)، التي تعبر سطحاً معامداً للخطوط في منطقة ما، متناسب مع قيمة الحقل في تلك المنطقة. وبالتالي، فإن خطوط الحقل تكون متقاربة من بعضها عندما يكون الحقل الكهربائي قوياً، وتكون متباعدة عن بعضها البعض عندما يكون الحقل الكهربائي ضعيفاً.

يوضح الشكل (23.20) هاتين الخاصتين، لاحظ أن كثافة الخطوط خلال السطح A تكون أكبر من كثافة الخطوط خلال السطح B، لذلك، فإن قيمة الحقل الكهربائي على السطح A تكون أكبر من قيمة الحقل الكهربائي على السطح B. وعلاوة على ذلك، إن حقيقة كون خطوط الحقل الكهربائي عند مواقع مختلفة تمتلك اتجاهات مختلفة يدل على أن الحقل الكهربائي يكون غير منتظم.



الشكل (23.20): يبين خطوط حقل كهربائي تخترق سطحين A و B. إن قيمة الحقل على السطح A تكون أكبر من قيمة الحقل على السطح B، لأن كثافة الخطوط (عدد الخطوط في وحدة المساحة) على السطح A أكبر مما هي عليه السطح B.

إن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو، هل العلاقة بين شدة الحقل الكهربائي وكثافة خطوط الحقل تتفق مع المعادلة (23.9)؟؛ أي هل هي على وفاق مع علاقة الحقل الكهربائي E التي حصلنا

عليها من قانون كولون؟. أو هل إن رسم الحقل الكهربائي بالأسلوب المشروح أعلاه هو على وفاق مع علاقة الحقل الكهربائي؟.

للإجابة على هذا السؤال، لنتصور أن لدينا سطحاً كروياً ذا نصف قطر قدرها r، ولنتصور أن مركزه هو شحنة نقطية أو نقطة ذات شحنة مكافئة لتوزع شحني. بسبب تناظر كافة نقاط السطح الكروي بالنسبة للمركز (لها أبعاد r متساوية عن المركز)، فإن شدة الحقل الكهربائي تكون متماثلة في كل نقطة من نقاط السطح الكروي، ولهذا يكون عدد خطوط الحقل N المنبثقة من الشحنة النقطية مساوٍ لعدد الخطوط التي تخترق السطح الكروي. وبالتالي، فإن كثافة الخطوط (عدد خطوط الحقل في وحدة المساحة للسطح الكروي) ستعطى بالعلاقة:

$$\frac{N}{4\pi r^2}$$

حيث إن $4\pi r^2$ هي مساحة السطح الكروي.

وبما أن قيمة الحقل الكهربائي E تتناسب مع كثافة الخطوط؛ أي:

$$E \propto \frac{N}{4\pi r^2}$$

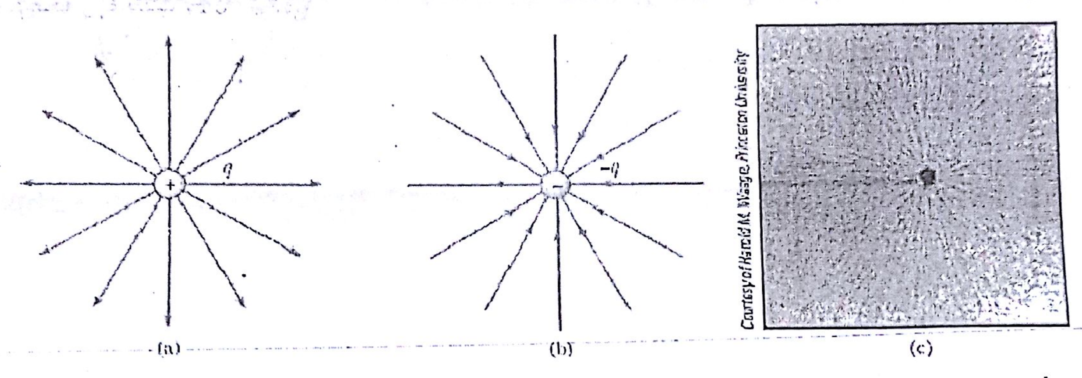
فإن شدة الحقل الكهربائي E ستكون تابعة للمقدار $1/r^2$، وهذا يعني أن العلاقة بين الحقل الكهربائي وكثافة الخطوط على وفاق مع المعادلة (23.9).

تحذير 23.2: خطوط الحقل الكهربائي ليست مسارات للجسيمات

إن خطوط الحقل الكهربائي تمثل الحقل عند المواقع المختلفة، وهي، باستثناء حالات خاصة جداً، لا تمثل مسارات للجسيمة المشحونة (الشحنة الاختبارية) التي تتحرك في الحقل الكهربائي.

يبين الشكل (23.21) (a) خطوط حقلٍ كهربائيٍ تُمثل حقلاً كهربائياً يعود إلى (أو يتولد عن) شحنة نقطية موجبة مفردة. إن الرسم الثنائي-البعد هذا يُظهر فقط خطوط الحقل الكهربائي الواقعة في مستوٍ يحوي لتلك الشحنة النقطية. فعلياً، إن هذه الخطوط تتوجه وفق أنصاف-الأقطار، منطلقة من هذه الشحنة في كافة الاتجاهات نحو خارجها، عابرةً أسطحٍ كرويةً متمركزة (لها نفس المركز). وهكذا بالحقيقة فإنه، بدلاً من دائرة خطوط الحقل الكهربائي التي يظهرها الشكل، من المفترض أن نرسم توزعاً كروياً تاماً. وبما أن أي شحنة اختبارية موجبة نضعها في هذا الحقل ستتنافر مع الشحنة الموجبة-المصدرة (المولدة لهذا الحقل)، فإن خطوط الحقل ستكون متوجهة على امتداد أنصاف-الأقطار متباعدة عن الشحنة-المصدرة، لاحظ أن الخطوط تصبح أكثر تباعداً عن بعضها البعض كلما ابتعدت عن الشحنة-المصدرة، وبالتالي كلما صارت كثافة الخطوط أقل، وهذا يدل على أن شدة الحقل تتناقص مع الابتعاد عن الشحنة-المصدرة.

وإن خطوط الحقل الكهربائي الممثلة لحقل كهربائي يعود إلى شحنة نقطية سالبة مفردة ستكون متجهة نحو هذه الشحنة، انظر الشكل (23.21)(b). في هذه الحالة أيضاً، تكون الخطوط متوجهة على امتداد أنصاف-الأقطار، لكن آتيةً من اللانهاية. لاحظ، في هذه الحالة، أن الخطوط تصبح أكثر تقارباً من بعضها البعض كلما اقتربت من الشحنة؛ وهذا يعني أن شدة الحقل الكهربائي تزداد كلما اقتربنا من الشحنة-المصدرة.



الشكل (23.21): خطوط الحقل الكهربائي من أجل شحنة نقطية. (a) من أجل شحنة نقطية موجبة، تكون خطوط الحقل الكهربائي موجهة وفق أنصاف الأقطار نحو الخارج، (b) ومن أجل شحنة نقطية سالبة، تكون خطوط الحقل الكهربائي موجهة وفق أنصاف الأقطار نحو الداخل. انتبه، إن هذين الشكلين يُظهران فقط تلك الخطوط التي تقع في مستوٍ ورقة الكتاب. في الصورة الفوتوغرافية (c) إن المساحات العاتمة هي قطع خيط صغيرة (سريد؛ بُرادة) معلقة في زيت، كانت قد اصطفت بفعل حقلٍ كهربائي متولد عن ناقلٍ موجود عند مركز الصورة (العاتم).

قواعد الرسم

إن قواعد رسم خطوط الحقل الكهربائي هي كما يلي:

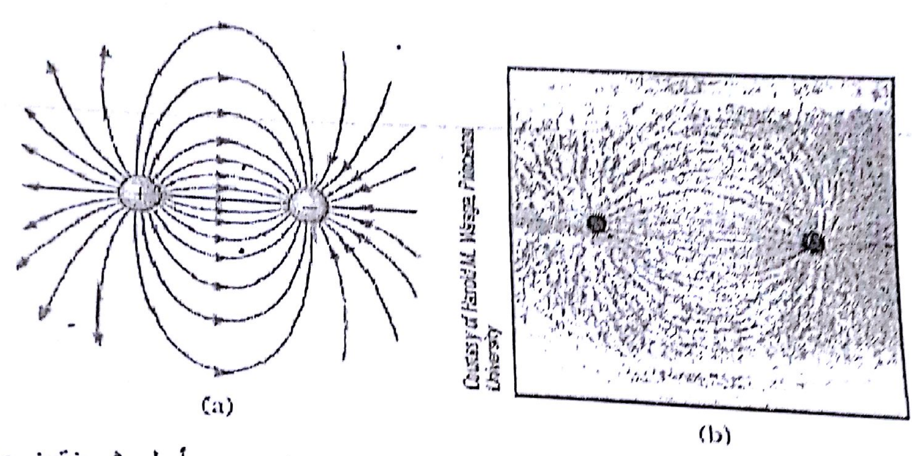
- إن خطوط الحقل الكهربائي يجب أن تكون منطلقةً من الشحنة الموجبة، وأن تكون منتهية إلى الشحنة السالبة. وفي حال وجود شحنة زائدة من أحد نوعين، يجب رسم بعض الخطوط التي تنطلق من اللانهاية أو تنتهي بعيداً إلى حد لا نهائي.
- إن عدد خطوط الحقل الكهربائي المرسومة، سواءً المغادرة لشحنة موجبة أو القادمة إلى شحنة سالبة، يجب أن متناسباً مع قيمة الشحنة.
- لا يجوز أن يكون هنالك خطين متقاطعين.

يجب اختيار عدد خطوط الحقل التي تنطلق من أي جسم مشحون إيجاباً بشحنة q بحيث يكون مساوٍ لـ $C\,q$، ويجب اختيار عدد الخطوط التي تنتهي إلى أي جسم مشحون سلباً بشحنة $-q$ بحيث يكون مساوٍ لـ $C\,|q|$، حيث C هو ثابت تناسب يمكن اختياره بشكل كيفي. لكن بمجرد أن تختار الثابت C، يجب عليك المحافظ عليه عند رسم الخطوط من أجل كافة الشحن الموجودة؛ أي إذا امتلك

جسم أول 1 شحنة قدرها Q_1، وجسم ثان 2 شحنة قدرة Q_2، فإن النسبة بين عدد خطوط المرسومة في حقلي لشحنتين يجب أن يكون مساوٍ للنسبة بين قيمتي هاتين الشحنتين؛ أي:

$$\frac{N_2}{N_1}=\frac{Q_2}{Q_1}$$

يبين الشكل (23.22) خطوط الحقل الكهربائي من أجل شحنتين نقطيتين متساويتين بالقيمة ومتعاكستين بالإشارة (ثنائي-قطب كهربائي). بما أن الشحنتين متساويتين بالقيمة، فإن عدد الخطوط التي تبدأ من عند الشحنة الموجبة تجب أن يساوي لعدد الخطوط التي تنتهي عند الشحنة السالبة. وعند النقاط القريبة من الشحنة تكون الخطوط تقريباً نصف-قطرية (مرسومة وفق أنصاف-الأقطار). حيث تشير الكثافة العالية للخطوط بين الشحنتين إلى منطقة ذات حقل كهربائي قوي.

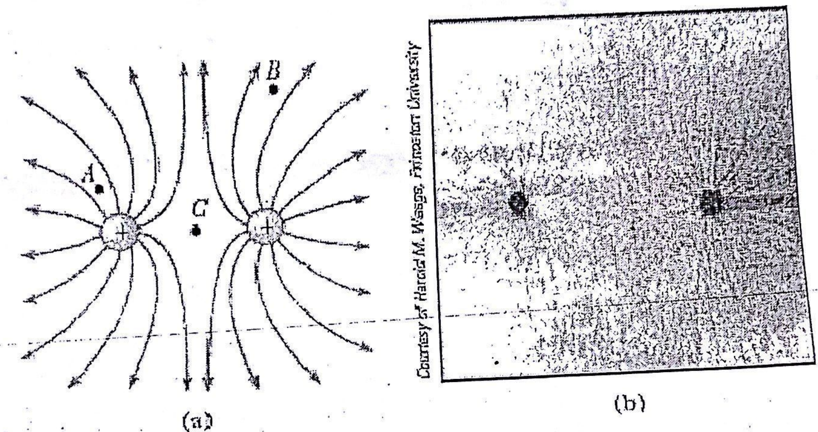


الشكل (23.22): (a) يبين رسماً لخطوط الحقل الكهربائي من أجل شحنتين متساويتين بالقيمة مختلفتين بالإشارة (ثنائي-قطب كهربائي). يظهر فيه أن عدد الخطوط التي تغادر من عند الشحنة الموجبة يساوي إلى عدد الخطوط التي تنتهي عند الشحنة السالبة. في الصورة الفوتوغرافية (b) تمثل الخطوط العاتمة قطع خيط صغيرة (سريد) معلقة في زيت كانت قد اصطفت بفعل الحقل الكهربائي لثنائي-قطب.

تحذير (23.3): خطوط الحقل الكهربائي ليست حقيقية

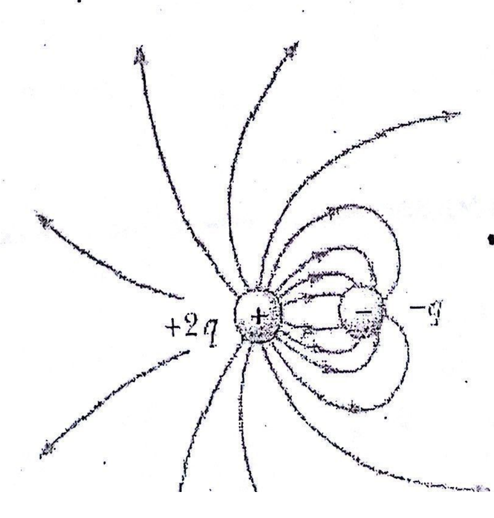
الحقيقة إن خطوط الحقل الكهربائي ليست أجسام مادية. وهي ليست سوى طريقة لتمثيل تصويري يقدم وصفاً نوعياً للحقل الكهربائي. فعملياً يمكننا أن نرسم لكل شحنة عدداً محدوداً فقط من الخطوط، التي تجعل الحقل يظهر كما لو أنه مكمم وموجود فقط في أجزاء محددة من الفراغ. مع أن وجود الحقل، في الحقيقة، مستمرٌ في كُلِّ نقطة من نقاطه. أيضاً حاذر من أن يحصل لديك انطباع خاطئاً عن الرسوم الثنائية-البعد لخطوط الحقل التي نستخدمها لتوصيف حالات ثلاثية الأبعاد.

يبين الشكل (23.23) خطوط الحقل الكهربائي بجوار شحنتين موجبتين. مرة أخرى، إن خطوط الحقل الكهربائي عند النقاط القريبة من كلا الشحنتين تكون تقريباً نصف-قطرية (مرسومة وفق أنصاف-الأقطار)، وكذلك أيضاً من كل شحنة ينبثق نفس العدد من الخطوط، لأن الشحنتين متساويتين بالقيمة. وعند مسافة كبيرة من الشحنتين، يكون الحقل الكهربائي المتولد عنهما مساوٍ تقريباً للحقل يتولد عن شحنة نقطية مفردة قيمتها $2q$ (موضوعة في المركز C بين الشحنتين).



الشكل (23.23): يبين (a) خطوط الحقل الكهربائي لشحنتين نقطيتين موجبتين. إن المواضع A و B و C يناقشها الاختبار السريع (23.7). في الصورة الفوتوغرافية (b) يظهر اصطفاف سريد خيط معلق في زيت بفعل الحقل الكهربائي ناشئ عن شحنتين موجبتين متساويتين بالقيمة.

أخيراً نقدم، في الشكل (23.24) رسماً تخطيطياً لخطوط الحقل الكهربائي الممثلة لشحنة موجبة $+2q$ وشحنة سالبة $-q$. في هذا الحالة، إن عدد الخطوط المغادرة الشحنة $+2q$ يكون ضعف عدد الخطوط التي تنتهي عند الشحنة $-q$. وهكذا، فإنه يصل إلى الشحنة السالبة فقط نصف عدد الخطوط المغادرة للشحنة الموجبة. أما النصف الباقي فينتهي على الشحنة السالبة، نحن افترضنا بأنه غير منتهي. وعند مسافات تكون أكبر بكثير من المسافة الفاصلة بين الشحنتين، تكون خطوط الحقل الكهربائي مكافئة لخطوط الحقل الكهربائي لشحنة وحيدة (مكافئة) $+q$.



الشكل (23.24): خطوط الحقل الكهربائي من أجل شحنة نقطية $+2q$ وشحنة نقطية ثانية $-q$. لاحظ أن هنالك خطين يغادران الشحنة $+2q$ مقابل كل خط ينتهي على الشحنة $-q$.

وظيفة: ارسم خطوط الحقل الكهربائي لشحنتين أحدهما $+q$ والأخرى $-3q$. ملاحظة: اجعل المسافة بينهما كبيرة حتى تتمكن من رسم عدد أكبر من الخطوط.

اختبار سريع (23.7):

رتّب قيم الحقل الكهربائي عند النقاط A و B و C المبينة في الشكل (23.23)(a)، القيمة الأكبر أولاً.

اختبار سريع (23.8):

أيّ من العبارات التالية عن خطوط الحقل الكهربائي الممثلة للشحن الكهربائية، في الشكل (23.23)، تكون خاطئة؟

(a) خطوط الحقل الكهربائي يمكن أن تكون مستقيمة أو منحنية،

(b) خطوط الحقل الكهربائي يمكن أن تشكل حلقات مغلقة،

(c) خطوط الحقل الكهربائي تبدأ من على الشحن الموجبة وتنتهي على الشحن السالبة،

(d) خطوط الحقل الكهربائي لا يمكنها أبداً أن تتقاطع مع بعضها البعض.

23.7. حركة الجسيمات المشحونة في حقل كهربائي منتظم

عندما يوضع جسيم ذو شحنة q وكتلة m في حقل كهربائي E، فإن، القوة الكهربائية الممارسة على هذه الشحنة، وفقاً للمعادلة (23.8)، تكون qE.

فإذا كانت هذه القوة هي القوة الوحيدة المُمارسة على هذا الجسيم، فإنها، وفقاً لقانون نيوتن الثاني، يجب أن تكون هي القوة الصافية (المحصلة) التي تسبب تسارع الجسيم؛ أي أن:

$$F_e = qE = ma،$$

ولذلك، يكون تسارع الجسيم:

$$a = \frac{q\,E}{m} \qquad (23.12)$$

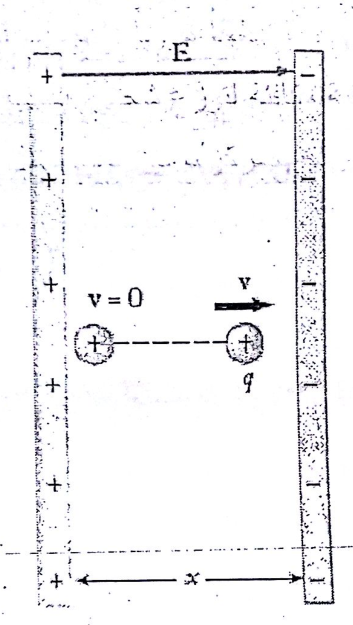
وإذا كان الحقل الكهربائي E منتظماً؛ أي أنه ثابت القيمة والاتجاه، فإن التسارع يكون ثابتاً.

وإذا كان الجسيم يمتلك شحنة موجبة $+q$، فإن تسارعه يكون في اتجاه الحقل الكهربائي،

أما إذا كان الجسيم يمتلك شحنة سالبة $-q$، فإن تسارعه يكون في اتجاه معاكس لاتجاه الحقل الكهربائي.

مثال (23.10): شحنة موجبة متسارعة

تنطلق شحنة نقطية موجبة q ذات كتلة m من السكون في حقل كهربائي منتظم E يتجه على امتداد المحور x، كما هو مبين في الشكل (23.25)، صف حركة هذا الجسيم.



الشكل (23.25)؛ للمثال (23.10): شحنة نقطية موجبة q في حقل كهربائي منتظم E تخضع لتسارع ثابت a في اتجاه الحقل.

الحل: إن التسارع الشحنة النقطية يكون ثابتاً، ويعطى بالعلاقة:

$$a = \frac{q\,E}{m}$$

وحركة الجسيم تكون حركة خطية (مستقيمة) بسيطة على امتداد المحور x. لذلك يمكننا أن نطبق معادلات (علم) الحركة في بعد واحد، (راجع الفصل 2):

$$x_f = x_i + v_i t + \tfrac{1}{2}at^2$$

$$v_f = v_i + a_i t$$

$$v_f{}^2 = v_i{}^2 + 2a(x_f - x_i)$$

باختيار الوضع الابتدائي للشحنة بحيث $x_i = 0$، وبزعم أن $v_i = 0$ لأن الجسيم ينطلق من السكون، فإن موضع الجسيم كتابع للزمن سيكون:

$$x_f = \tfrac{1}{2}at^2 = \frac{q\,E}{2m}t^2$$

وستكون سرعة هذا الجسيم:

$$v_f = a_i t = \frac{q\,E}{m}t$$

وستكون معادلة الثالثة للحركة:

$$v_f{}^2 = 2ax_f = \left(\frac{2q\,E}{m}\right)x_f$$

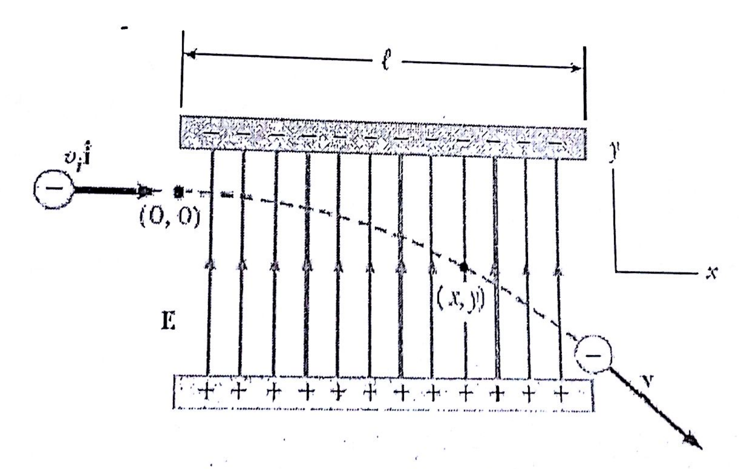
ومنها يمكننا إيجاد الطاقة الحركية للشحنة بعد أن تكون قد اجتازت مسافة $\Delta x = x_f - x_i$:

$$K = \frac{1}{2}mv_f{}^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{2qE}{m}\right)\Delta x = qE\Delta x$$

يمكننا أيضاً التوصل إلى هذه النتيجة من مبرهنة أن العمل هو طاقة حركية، لأن العمل الذي تنجزه القوة الكهربائية هو $W = F_e\Delta x$ وهو أيضاً يمثل تغير الطاقة الحركية $W = \Delta K$.

إن الحقل الكهربائي في المنطقة بين صفيحتين معدنيتين مسطحتين (متوازيتين) مشحونتين بشحن متعاكسة يكون منتظماً تقريباً، الشكل (23.26). افرض أن إلكتروناً شحنته e يسقط أفقاً عند اللحظة $t = 0$ في هذا الحقل، منطلقاً من مبدأ الإحداثيات بسرعة ابتدائية $v_i\hat{\boldsymbol{\imath}}$. بما الحقل الكهربائي $\boldsymbol{E}$ في الشكل (23.26) هو في الاتجاه الموجب لـــ y، فإن تسارع الإلكترون يكون في الاتجاه السالب لـــ y؛ أي أن:

$$\boldsymbol{a} = -\frac{e\,E}{m_e}\hat{\boldsymbol{\jmath}} \qquad (23.13)$$



الشكل (23.26): إلكترون يسقط أفقياً في حقل كهربائي منتظم ناتج عن صفيحتين مشحونتين (متوازيتين). يخضع الإلكترون لتسارع متجه نحو الأسفل (بعكس $\boldsymbol{E}$)، وحركته تكون على شكل قطع مكافئ عندما يكون بين الصفيحتين.

بما أن التسارع ثابت، فإنه يمكننا تطبيق معادلات (علم) الحركة في بعدين، (انظر الفصل 4)، في البدء $v_{xi} = v_i$ و $v_{yi} = 0$. بعد أن يقع الإلكترون في الحقل الكهربائي لفاصل زمني، فإن مركبتي السرعة عند تلك اللحظة تكونان:

$$v_x = v_i = constant \qquad (23.14)$$

$$v_y = a_y t = -\frac{eE}{m_e}t \qquad (23.15)$$

إحداثيا موقعه عند اللحظة t تكونان:

$$x_f = v_i t \quad (23.16)$$

$$y_f = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2}\frac{eE}{m_e} t^2 \quad (23.17)$$

بتعويض القيمة $t = x_f/v_i$ من المعادلة (23.16) في المعادلة (23.17)، نرى بأن y_f يتناسب مع $x_f{}^2$، وبالتالي، فإن المسار هو قطع مكافئ. إن هذا لا يجب أن يكون مفاجئاً، حيث إن هذه الحالة تعتبر مماثلة لحالة رمي كرة أفقياً في حقل الجاذبية (الأرضية)، (راجع الفصل 4). بعد أن يغادر الإلكترون الحقل تنتهي القوة الكهربائية والإلكترون يواصل التحرك في خط مستقيم باتجاه v في الشكل (23.26) بسرعة (محصلة) $v > v_i$.

لاحظ أننا أهملنا تأثير حقل الجاذبية الأرضية على الإلكترون، وهذا تقريب جيد. فقد لاحظنا ذلك عند التعامل مع الجسيمات الذرية، فمن أجل حقل كهربائي قدره $10^4\ N/C$، وجدنا أن نسبة قيمة القوة الكهربائية eE إلى قيمة قوة الجاذبية الأرضية mg كانت من رتبة 10^4 من أجل الإلكترون، ومن رتبة 10^{11} من أجل البروتون.

تحذير (23.4): قوة أخرى ليس إلا

إن القوى والحقول الكهربائية يمكن أن تبدو لك وكأنها غير تطبيقية. عند تقدير القوة الكهربائية F_e، فإنها وفقاً لفهمنا الراسخ جيداً للقوى والحركة من الفصلين 5 و 6 ليست سوى العلة المحركة للجسيم، إن الحفاظ على إبقاء ارتباطك الذهني بما درسته في الماضي سيساعدك كثيراً في حل مسائل هذا الفصل.

مثال (23.11): إلكترون متسارع

إلكترون يدخل منطقة ذات حقل كهربائي منتظم لصفيحتين متوازيتين كما هو مبين في الشكل (23.26) بسرعة ابتدائية $v_i = 3.00 \times 10^6\ m/s$، إذا كان الحقل الكهربائي المنتظم بين الصفيحتين هو $E = 200\ N/C$ والطول الأفقي للصفيحتين هو $\ell = 0.100\ m$.

$e = 1.6 \times 10^{-19} C$
$m_e = 9.11 \times 10^{-31} Kg$

المطلوب:

(A): أوجد تسارع الإلكترون عندما يكون خاضع للحقل الكهربائي.

(B): إذا كان الإلكترون يدخل عند اللحظة $t = 0$، أوجد اللحظة التي يغادر عندها الإلكترون الحقل.

(C): إذا كان الموضع الشاقولي للإلكترون عندما دخوله إلى الحقل هو $y_i = 0$، فما سيكون موضعه الشاقولي عند مغادرته للحقل؟

الحل

(A): إن الإلكترون يمتلك شحنة المطلقة هي $e = 1.60 \times 10^{-19} C$، وكتلة هي $m_e = 9.11 \times 10^{-31} kg$. لذلك فإن المعادلة (23.13) تعطي:

$$a = -\frac{e\,E}{m_e}\hat{j} = \frac{(1.60 \times 10^{-19} C)(200\,N/C)}{9.11 \times 10^{-31} kg}\hat{j} = -3.51 \times 10^{13}\hat{j}\,m/s^2$$

(B): إن المسافة الأفقية عبر الحقل هي $\ell = 0.100\,m$. باستخدام المعادلة (23.16)؛ $x_f = v_i t$، لدينا $x_f = \ell$، نجد أن اللحظة الزمنية التي يخرج عندها الإلكترون من الحقل الكهربائي هي:

$$t = \frac{\ell}{v_i} = \frac{0.100\,m}{3.00 \times 10^6\,m/s} = 3.33 \times 10^{-8} s$$

(C): باستخدام المعادلة (23.17)؛ $y_f = \frac{1}{2}a_y t^2$ والنتيجتين من (A) و (B)، نجد أن:

$$y_f = \frac{1}{2}a_y t^2 = -\frac{1}{2}(3.51 \times 10^{13}\,m/s^2)(3.33 \times 10^{-8} s)^2$$
$$= -0.0195\,m = -1.95\,cm$$

إذا ما دخل الإلكترون تماماً أدنى الصفيحة السالبة في الشكل (23.26) وكان الفاصل بين الصفيحتين أقل من القيمة التي وجدناها، فإن الإلكترون سيصطدم بالصفيحة الموجبة.

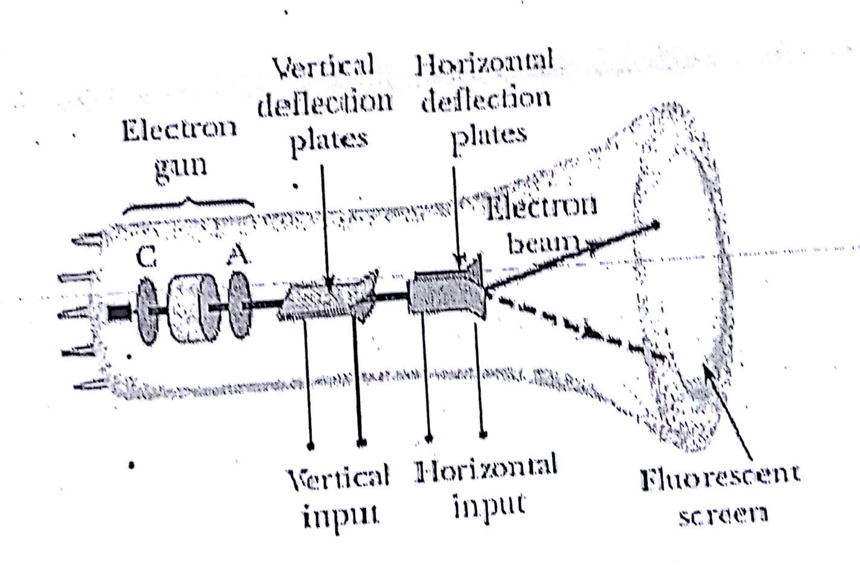
أنبوبة الأشعة المهبطية (أنبوبة أشعة المهبط)

إن المثال الذي نقدمه يصف فقط جزء من أنبوبة الأشعة المهبطية (CRT). إن هذه الأنبوبة، الموضحة في الشكل (23.27)، تستخدم بشكل شائع للحصول على عرض بصري للمعلومات الإلكترونية في رواسم الإشارة، وفي منظومات الرادار، وفي الاستقبال التلفازي وفي شاشات الحواسيب. إن CRT هي أنبوبة مفرغة تسرع فيها حزمة من إلكترونات وتحرف تحت تأثير حقلين كهربائي ومغناطيسي. تنتج الحزمة الإلكترونية من منظومة، تدعى البندقية (المدفع) الإلكتروني *electron gun*، موضوعة في عنق الأنبوبة. هذه الإلكترونات، إذا ما انطلقت بصورة غير مبعثرة، فإنها تسافر في مسار خطي-مستقيم إلى أن تصطدم بواجهة CRT؛ الشاشة، التي تكون مغطاة بمادة تبعث ضوءً مرئياً بمجرد اصطدام الإلكترونات بها.

في راسم الإشارة، تنحرف الإلكترونات في الاتجاهات المختلفة بواسطة مجموعتين من الصفائح الموضوعتين بزاوية قائمة بالنسبة لبعضهما البعض في عنق الأنبوبة. إن أنبوبة أشعة

المهبط التلفزيونية توجه الحزمة بواسطة حقل مغناطيسي، كما سنشرح ذلك في الفصل 29، تستخدم دارة إلكترونية خارجية للتحكم بكمية الشحنة الموجودة على الصفائح. إن وضع شحنة موجبة على الصفيحة الأفقية وشحنة سالبة على الموازية الأخرى يولد حقلاً كهربائياً بين الصفيحتين ويتيح للحزمة أن تتوجه من جانب إلى آخر.

إن صفائح الحرف الشاقولي تعمل بنفس الطريقة، عدا أن تغير الشحنة عليها يحرف الحزمة شاقولياً.



الشكل (23.27): رسم تخطيطي لأنبوبة أشعة مهبطية. الإلكترونات التي تغادر المهبط C تُسرع إلى المصعد A، إضافة إلى الإلكترونات المسرعة، يستخدم المدفع الإلكتروني أيضاً لمحرقة حزمة الإلكترونات، والصفائح تحرف الحزمة.